


**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**СУРГУТСКИЙ ИНСТИТУТ НЕФТИ И ГАЗА**  
(ФИЛИАЛ) ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
(Филиал ТИУ в г. Сургуте)

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Председатель КСН  
Ю.В. Ваганов  
« 10 » 06 2019 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

Наименование дисциплины:

**Подземная гидромеханика нефтяного  
пласта**

направление подготовки:

**21.03.01 Нефтегазовое дело**

направленность:

**Эксплуатация и обслуживание объектов  
добычи нефти**

форма обучения:

**очная/очно-заочная**

Рабочая программа разработана в соответствии с утвержденным учебным планом от 09.02.2018 г. и требованиями ОПОП ВО по направлению подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело, направленность Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти к результатам освоения дисциплины Подземная гидромеханика нефтяного и газового пласта.

Рабочая программа рассмотрена  
на заседании кафедры Нефтегазовое дело


Протокол № 15 от «6» 06 2019 г.

И.о. заведующего кафедрой  Р.Д. Татлыев

СОГЛАСОВАНО:

И.о. заведующего выпускающей кафедрой  Р.Д. Татлыев

«6» 06 2019 г.

Рабочую программу разработал:  
Муравьев К.А., доцент кафедры НД, к.т.н., 

## 1. Цели и задачи освоения дисциплины

**Цель:** усвоение законов движения жидкости и газа в пористых средах, а также применение этих законов к задачам инженерной практики. Образовательные ресурсы дисциплины призваны сформировать универсальные и общепрофессиональные компетенции: ПКС-6.

**Задачи** дисциплины: изучить основные законы движения жидкости, газа и газожидкостных смесей в пористых средах и выявить отличительные особенности фильтрации в сравнении с движением жидкости и газа по трубам.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина относится к дисциплинам обязательной части, формируемой участниками образовательных отношений.

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются:

знание:

- основных положений и направлений развития отечественной и зарубежной исследовательской деятельности;

умение:

- воспринимать, обобщать и анализировать информацию по направлению исследований;

владение:

- методами и средствами сбора, анализа и применения информации по направлению исследований.

Содержание дисциплины Подземная гидромеханика нефтяного пласта является логическим продолжением содержания дисциплин Основы нефтегазопромыслового дела, Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика, Физика пласта.

## 3. Результаты обучения по дисциплине

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

Таблица 3.1

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции (ИДК)	Код и наименование результата обучения по дисциплине (модулю)
<b>ПКС-6</b> Способность применять процессный подход в практической деятельности, сочетать теорию и практику в соответствии с выбранной сферой профессиональной деятельности	<b>ПКС-6.2</b> Анализирует правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Знать (З1): правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы
		Уметь (У1): верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования
		Владеть (В1): навыками работы со средствами обработки информации

## 4. Объем дисциплины

Общий объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, 144 часов.

Таблица 4.1.

Форма обучения	Курс/ семестр	Аудиторные занятия / контактная работа, час.				Самостоятельная работа, час.	Форма промежуточной аттестации
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия	контроль		

				я			
очная	3/6	17	34	-	36	57	экзамен
очно-заочная	4/7	12	14	-	36	82	экзамен
заочная	4/7	10	8	-	9	117	экзамен

## 5. Структура и содержание дисциплины

### 5.1. Структура дисциплины.

#### очная форма обучения (ОФО) / очно-заочная форма обучения (ОЗФО)

Таблица 5.1.1

№ п/п	Структура дисциплины		Аудиторные занятия, час.			СРС, час.	Всего, час.	Код ИДК	Оценочные средства
	Номер раздела	Наименование раздела	Л.	Пр.	Ла б.				
1	1	Установившееся движение однородной сжимаемой жидкости и газа	2/1/1	5/2/1	-	7/10/14	14/13/16	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
2	2	Установившаяся фильтрация газированной жидкости	2/2/1	5/2/1	-	7/10/14	14/14/16	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
3	3	Установившийся фильтрационный поток, в котором одна жидкость вытесняет другую	2/2/1	6/2/1	-	7/10/14	15/14/16	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
4	4	Неустановившаяся фильтрация упругой жидкости	2/2/1	6/2/1	-	7/11/14	15/15/16	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
5	5	Неустановившаяся фильтрация газа	2/1/1	6/2/2	-	7/10/14	15/13/17	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
6	6	Движение границы раздела двух жидкостей с учетом неполноты вытеснения	2/1/1	6/4/2	-	7/10/15	15/15/18	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
7	7	Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах	3/2/2	-/-	-	8/11/16	11/13/18	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
8	8	Фильтрация неньютоновских жидкостей	2/1/2	-/-	-	7/10/16	9/11/18	ПКС-6.2	Тестирование, решение задач
	Курсовая работа					18/18/5	18/18/5	ПКС-6.2	Доклад и защита
5	Экзамен		-	-	-	18/18/4	18/18/4	ПКС-6.2	Экзаменационный тест
Итого:			17/12/10	34/14/8		93/118/126	144/144/144		

### 5.2. Содержание дисциплины.

#### 5.2.1. Содержание разделов дисциплины (дидактические единицы).

##### Раздел 1. Установившееся движение однородной сжимаемой жидкости и газа.

Установившееся движение однородной сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Дифференциальные уравнения установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Функция Л.С. Лейбензона. Установившаяся фильтрация сжимаемой (упругой)

жидкости и идеального газа. Средневзвешенное давление. Фильтрация реального газа. Формирование Интеллектуально-познавательных умений по стимулированию познавательной активности и расширению кругозора.

#### **Раздел 2. Установившаяся фильтрация газированной жидкости.**

Установившаяся фильтрация газированной жидкости. Растворимость газа в нефти. Насыщенность порового пространства жидкой фазой. Фазовая проницаемость пористой среды. Газовый фактор. Определение распределения давления в пласте и дебита жидкости и газа в условиях притока к галереи к совершенной скважине. Функция С.А. Христиановича и ее определения по методам Б.Б. Лапука, И.А. Чарного и Г.Б. Пыхачева.

#### **Раздел 3. Установившийся фильтрационный поток, в котором одна жидкость вытесняет другую.**

Установившийся фильтрационный поток, в котором одна жидкость вытесняет другую (поршневое вытеснение). Условия на границе раздела двух жидкостей. Скорость перемещения границы раздела. Плоско-параллельное и плоско-радиальное вытеснение нефти водой. Время полного вытеснения нефти водой. Анализ явления поднятия подошвенной воды (конусообразование).

#### **Раздел 4. Неустановившаяся фильтрация упругой жидкости.**

Неустановившаяся фильтрация упругой жидкости. Упругий режим пласта и его характерные особенности. Подсчет упругого запаса жидкости в пласте. Дифференциальное уравнение упругого режима фильтрации. Точные решения уравнения пьезопроводности для притока к галерее и точечному стоку в неограниченном пласте. Понятия о точных решениях для ограниченного пласта круговой и полосообразной формы. Приближенные методы решения нестационарной фильтрации упругой жидкости. Метод последовательной смены стационарных состояний. Метод А.М. Пирвердяна. Метод Э.Б. Чекалюка. Суперпозиция в задачах упругого режима.

#### **Раздел 5. Неустановившаяся фильтрация газа.**

Неустановившаяся фильтрация газа. Дифференциальное уравнение Л.С. Лейбензона нестационарной фильтрации газа. Линеаризация дифференциального уравнения Л.С. Лейбензона и его основное решение. Метод последовательной смены стационарных состояний для газа.

#### **Раздел 6. Движение границы раздела двух жидкостей с учетом неполноты вытеснения.**

Движение границы раздела двух жидкостей с учетом неполноты вытеснения. Основные характеристики многофазной фильтрации. Относительная фазовая проницаемость. Скорость фильтрации отдельных фаз. Дифференциальные уравнения многофазной фильтрации: уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения состояния жидкостей. Основы теории вытеснения нефти водой. Полная система дифференциальных уравнений для плоско-параллельного течения в горизонтальном пласте. Теория Баклея-Левретта. Скачок насыщенности. Координата фронта насыщенности. Определение водонасыщенности на фронте вытеснения и средней водонасыщенности в области двухфазного течения по графику функции Левретта. Определение времени безводного периода при непоршневом вытеснении нефти водой. Определение коэффициента нефтеотдачи в случаях без связанной воды и со связанной водой.

#### **Раздел 7. Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.**

Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Особенности фильтрации в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Вывод дифференциальных уравнений движения жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Установившаяся одномерная фильтрация жидкости и газа в трещиноватом и трещиновато-пористом пласте.

#### **Раздел 8. Фильтрация неньютоновских жидкостей.**

Фильтрация неньютоновских жидкостей. Реологические модели фильтрующихся жидкостей и нелинейные законы фильтрации. Одномерные задачи фильтрации вязко-пластичной жидкости. Зональность распространения многолетне-мерзлых пород в Западной Сибири. Особенности протаивания и промерзания ММП.

### 5.2.2. Содержание дисциплины/модуля по видам учебных занятий.

#### **Лекционные занятия**

Таблица 5.2.1

№ п/п	Номер раздела дисциплины	Объем, час.	Тема лекции
		ОФО/ ОЗФО/ ЗФО	
1	1	2/1/1	Установившееся движение однородной сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Дифференциальные уравнения установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Функция Л.С. Лейбензона. Установившаяся фильтрация сжимаемой (упругой) жидкости и идеального газа. Средневзвешенное давление. Фильтрация реального газа. Формирование Интеллектуально-познавательных умений по стимулированию познавательной активности и расширению кругозора.
2	2	2/2/1	Установившаяся фильтрация газированной жидкости. Растворимость газа в нефти. Насыщенность порового пространства жидкой фазой. Фазовая проницаемость пористой среды. Газовый фактор. Определение распределения давления в пласте и дебита жидкости и газа в условиях притока к галереи к совершенной скважине. Функция С.А. Христиановича и ее определения по методам Б.Б. Лапука, И.А. Чарного и Г.Б. Пыхачева.
3	3	2/2/1	Установившийся фильтрационный поток, в котором одна жидкость вытесняет другую (поршневое вытеснение). Условия на границе раздела двух жидкостей. Скорость перемещения границы раздела. Плоско-параллельное и плоско-радиальное вытеснение нефти водой. Время полного вытеснения нефти водой. Анализ явления поднятия подошвенной воды (конусообразование).
4	4	2/2/1	Неустановившаяся фильтрация упругой жидкости. Упругий режим пласта и его характерные особенности. Подсчет упругого запаса жидкости в пласте. Дифференциальное уравнение упругого режима фильтрации. Точные решения уравнения пьезопроводности для притока к галерее и точечному стоку в неограниченном пласте. Понятия о точных решениях для ограниченного пласта круговой и полосообразной формы. Приближенные методы решения нестационарной фильтрации упругой жидкости. Метод последовательной смены стационарных состояний. Метод А.М. Пирвердяна. Метод Э.Б. Чекалюка. Суперпозиция в задачах упругого режима.
5	5	2/1/1	Неустановившаяся фильтрация газа. Дифференциальное уравнение Л.С. Лейбензона нестационарной фильтрации газа. Линеаризация дифференциального уравнения Л.С. Лейбензона и его основное решение. Метод последовательной смены стационарных состояний для газа.
6	6	2/1/1	Движение границы раздела двух жидкостей с учетом неполноты вытеснения. Основные характеристики многофазной фильтрации. Относительная фазовая проницаемость. Скорость фильтрации отдельных фаз. Дифференциальные уравнения многофазной фильтрации: уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения состояния жидкостей. Основы теории вытеснения нефти

			водой. Полная система дифференциальных уравнений для плоско-параллельного течения в горизонтальном пласте. Теория Баклея-Левретта. Скачок насыщенности. Координата фронта насыщенности. Определение водонасыщенности на фронте вытеснения и средней водонасыщенности в области двухфазного течения по графику функции Левретта. Определение времени безводного периода при непоршневом вытеснении нефти водой. Определение коэффициента нефтеотдачи в случаях без связанной воды и со связанной водой.
7	7	3/2/2	Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Особенности фильтрации в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Вывод дифференциальных уравнений движения жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Установившаяся одномерная фильтрация жидкости и газа в трещиноватом и трещиновато-пористом пласте.
8	8	2/1/2	Фильтрация неньютоновских жидкостей. Реологические модели фильтрующихся жидкостей и нелинейные законы фильтрации. Одномерные задачи фильтрации вязкопластичной жидкости. Зональность распространения многолетне-мерзлых пород в Западной Сибири. Особенности протаивания и промерзания ММП.
Итого:		17/12/10	

### Практические занятия

Таблица 5.2.2

№ п/п	Номер раздела дисциплины	Объем, час.	Тема практического занятия
		ОФО/ ОЗФО/ ЗФО	
1	1	5/2/1	Границы применимости закона Дарси. Нелинейные законы фильтрации
2	2	5/2/1	Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости по закону Дарси
3	3	6/2/1	Установившийся приток жидкости к группе гидродинамически совершенных скважин. Интерференция скважин. Связь плоской задачи теории фильтрации с теорией функций комплексного переменного
4	4	6/2/1	Влияние гидродинамического несовершенства скважины на ее дебит
5	5	6/2/2	Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородных пластах
6	6	6/4/2	Аналогия между установившейся фильтрацией сжимаемой жидкости (газа) и несжимаемой жидкости. Функция Лейбензона
Итого:		34/14/8	-/-

### Лабораторные работы

Лабораторные работы учебным планом не предусмотрены

### Самостоятельная работа студента

Таблица 5.2.4

№ п/п	Номер раздела дисциплины	Объем, час.	Тема	Вид СРС
		ОФО/ ОЗФО/ ЗФО		
1	1	7/10/14	Установившееся движение однородной сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Дифференциальные уравнения установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа по закону Дарси. Функция Л.С. Лейбензона. Установившаяся фильтрация сжимаемой (упругой) жидкости и идеального газа. Средневзвешенное давление. Фильтрация реального газа. Формирование Интеллектуально-познаватель-ных умений по стимулированию познавательной активности и расширению кругозора.	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям
2	2	7/10/14	Установившаяся фильтрация газированной жидкости. Растворимость газа в нефти. Насыщенность порового пространства жидкой фазой. Фазовая проницаемость пористой среды. Газовый фактор. Определение распределения давления в пласте и дебита жидкости и газа в условиях притока к галереи к совершенной скважине. Функция С.А. Христиановича и ее определения по методам Б.Б. Лапука, И.А. Чарного и Г.Б. Пыхачева.	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, подготовка к тестированию
3	3	7/10/14	Установившийся фильтрационный поток, в котором одна жидкость вытесняет другую (поршневое вытеснение). Условия на границе раздела двух жидкостей. Скорость перемещения границы раздела. Плоско-параллельное и плоско-радиальное вытеснение нефти водой. Время полного вытеснения нефти водой. Анализ явления поднятия подошвенной воды (конусообразование).	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям
4	4	7/11/14	Неустановившаяся фильтрация упругой жидкости. Упругий режим пласта и его характерные особенности. Подсчет упругого запаса жидкости в пласте. Дифференциальное уравнение упругого режима фильтрации. Точные решения уравнения пьезопроводности для притока к галерее и точечному стоку в неограниченном пласте. Понятия о точных решениях для ограниченного пласта круговой и полосообразной формы. Приближенные методы решения нестационарной фильтрации упругой жидкости. Метод последовательной смены стационарных состояний. Метод А.М.	Изучение теоретического материала, подготовка к практическим занятиям, подготовка к тестированию



			Пирвердяна. Метод Э.Б. Чекалюка. Суперпозиция в задачах упругого режима.	
5	5	7/10/14	Неустановившаяся фильтрация газа. Дифференциальное уравнение Л.С. Лейбензона нестационарной фильтрации газа. Линеаризация дифференциального уравнения Л.С. Лейбензона и его основное решение. Метод последовательной смены стационарных состояний для газа.	Изучение теоретического материала, подготовка практическим занятиям к
6	6	7/10/15	Движение границы раздела двух жидкостей с учетом неполноты вытеснения. Основные характеристики многофазной фильтрации. Относительная фазовая проницаемость. Скорость фильтрации отдельных фаз. Дифференциальные уравнения многофазной фильтрации: уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения состояния жидкостей. Основы теории вытеснения нефти водой. Полная система дифференциальных уравнений для плоско-параллельного течения в горизонтальном пласте. Теория Баклея-Левретта. Скачок насыщенности. Координата фронта насыщенности. Определение водонасыщенности на фронте вытеснения и средней водонасыщенности в области двухфазного течения по графику функции Левретта. Определение времени безводного периода при непоршневом вытеснении нефти водой. Определение коэффициента нефтеотдачи в случаях без связанной воды и со связанной водой.	Изучение теоретического материала, подготовка практическим занятиям к
7	7	8/11/16	Движение жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Особенности фильтрации в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Вывод дифференциальных уравнений движения жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах. Установившаяся одномерная фильтрация жидкости и газа в трещиноватом и трещиновато-пористом пласте.	Изучение теоретического материала, подготовка практическим занятиям к
8	8	7/10/16	Фильтрация неньютоновских жидкостей. Реологические модели фильтрующихся жидкостей и нелинейные законы фильтрации. Одномерные задачи фильтрации вязкопластичной жидкости. Зональность распространения многолетне-мерзлых пород в Западной Сибири. Особенности протаивания и промерзания ММП.	Изучение теоретического материала, подготовка практическим занятиям и тестированию к и
9	1-8	18/18/5	Курсовая работа	Прохождение экзаменационного теста
10	1-8	18/18/4	Экзамен	
Итого:		93/118/126		

5.2.3. Преподавание дисциплины/модуля ведется с применением следующих традиционных и интерактивных видов образовательных технологий:

- лекции: лекция – визуализация с использованием мультимедийного материала; лекция проблемного характера; лекция – беседа;
- практические работы: работа в парах; индивидуальная работа; работа в группах; разбор практических ситуаций.
- курсовой проект: работа по индивидуальным заданиям

## **6. Тематика курсовых работ/проектов**

1. Основные понятия, законы фильтрации нефти газа воды. Системы единиц измерений, применяемые в подземной гидромеханике.
2. Границы применимости закона Дарси и нелинейные законы в задачах фильтрации пластовых флюидов.
3. Исследование одномерных фильтрационных потоков несжимаемой жидкости и газа в неоднородных пластах по закону Дарси.
4. Исследование движения жидкости со свободной поверхностью в пористой среде.
5. Изучение интерференции совершенных скважин при фильтрации нефти и газа.
6. Изучение особенностей притока жидкости и газа к несовершенным скважинам (при линейных и нелинейных законах фильтрации).
7. Исследование одномерных фильтрационных потоков упругой жидкости и газа (прямолинейно-параллельный и плоскорадиальный потоки).
8. Изучение приближенных методов решения задач притока газа.
9. Движение жидкостей и газов в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.
10. Изучение основ теории неизотермической фильтрации.
11. Безнапорное течение жидкости.
12. Влияние радиуса скважины на ее производительность.
13. Влияние скорости воды на нефтеотдачу пласта.
14. Движение газов в пористой среде.
15. Движение реальных газов в пористой среде по линейному закону фильтрации.
16. Зависимость проницаемости от пористости и размера пор.
17. Изучение гидродинамических моделей методов повышения нефтеотдачи и газоконденсатоотдачи пластов.
18. Исследования скважин на нестационарных режимах. Анализ кривых восстановления давления (КВД).
19. Источники пластовой энергии.
20. Методы определения параметров пластов и скважин при упругом режиме фильтрации.
21. Мицеллярные растворы и их применение в нефтедобыче.
22. Неустановившееся движение и метод последовательной смены стационарных состояний (ПССС).
23. Неустановившееся радиальное движение газированной жидкости в пористой среде.
24. Неустановившееся радиальное движение газов по линейному закону фильтрации.
25. Неустановившуюся фильтрацию жидкости и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых средах.
26. Одномерная задача о вытеснении нефти водой.
27. Одномерное и радиальное движение несжимаемой жидкости в условиях водонапорного режима.
28. Одномерные потоки фильтрации.
29. Особенности фильтрации неньютоновских жидкостей.
30. Плоско-радиальное движение жидкости в неоднородных пластах.
31. Поршневое вытеснение нефти водой при нестационарной фильтрации.
32. Расчет предельных дебитов горизонтальных скважин в пластах с подошвенной водой.

33. Простейшие фильтрационные потоки и методы их исследования.
34. Радиальное установившееся движение газов по линейному закону фильтрации.
35. Теория конусообразования Маскета-Чарного.
36. Установившееся движение газа, не подчиняющееся линейному закону фильтрации.
37. Фильтрация нефти и газа в трещиноватых и трещиновато-пористых породах. Закон Буссинеска.
38. Фильтрация неньютоновских жидкостей.
39. Проницаемость горных пород.

#### Объём:

1. Расчетно-пояснительная записка (РПЗ) – 25...50 стр.

#### Содержание пояснительной записки курсового проекта:

1. Введение.
2. Цель и задачи курсовой работы.
3. Краткая теория по теме курсовой работы.
4. Примеры числовых расчетов и графических решений.
5. Практическое использование полученных результатов.
6. Заключение. Выводы и рекомендации.
7. Список использованных источников.

### 7. Контрольные работы

Контрольные работы учебным планом не предусмотрены

### 8. Оценка результатов освоения дисциплины/модуля

8.1. Критерии оценивания степени полноты и качества освоения компетенций в соответствии с планируемыми результатами обучения приведены в Приложении 1.

8.2. Рейтинговая система оценивания степени полноты и качества освоения компетенций обучающихся очной формы обучения представлена в таблице 8.1.

Таблица 8.1

№ п/п	Виды мероприятий в рамках текущего контроля	Количество баллов
1 текущая аттестация		
1	Тест по 1 и 2 разделам	0-15
2	Отчет о выполнении практической работ «Границы применимости закона Дарси. Нелинейные законы фильтрации. Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости по закону Дарси.»	0-15
ИТОГО за первую текущую аттестацию		0-30
2 текущая аттестация		
1	Тест по 3, 4 и 5 разделам	0-15
2	Отчет о выполнении практической работ «Установившийся приток жидкости к группе гидродинамически совершенных скважин. Интерференция скважин. Связь плоской задачи теории фильтрации с теорией функций комплексного переменного. Влияние гидродинамического несовершенства скважины	0-15

	на ее дебит.»	
ИТОГО за вторую текущую аттестацию		0-30
3 текущая аттестация		
1	Тест по 6, 7 и 8 разделам	0-15
2	Отчет о выполнении практической работ «Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородных пластах. Аналогия между установившейся фильтрацией сжимаемой жидкости (газа) и несжимаемой жидкости. Функция Лейбензона.»	0-15
3	Дополнительный бонусный тест	0-10
ИТОГО за третью текущую аттестацию		0-40
<b>ВСЕГО</b>		<b>100</b>

## 9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

9.1. Перечень рекомендуемой литературы представлен в Приложении 2.

9.2. Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы:

– Электронная библиотечная система Elib, полнотекстовая база данных ТИУ, <http://elib.tsogu.ru/> (дата обращения 30.08.19)

– Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU, <http://elibrary.ru/> (дата обращения 30.08.19)

– Профессиональные справочные системы. Национальный центр распространения информации ЕЭК ООН. – Режим доступа: <http://www.cntd.ru> (дата обращения: 29.08.2019).

– Справочно-правовая система КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 29.08.2019).

– Система поддержки учебного процесса «Educon»;

– ЭБС «Издательства Лань», Гражданско-правовой договор №885-18 от 07.08.2018 г. на оказание услуг по предоставлению доступа к ЭБС между ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и ООО «Издательство Лань» (до 31.08.2020 г.);

– ЭБС «Электронного издательства ЮРАЙТ», Гражданско-правовой договор № 884-18 от 08.08.2018 г. на оказание услуг по предоставлению доступа к ЭБС между ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и ООО «Электронное издательство ЮРАЙТ» (до 31.08.2020 г.);

– ЭБС «Перспект», Гражданско-правовой договор № 882-18 от 09.08.2018 г. на предоставление доступа к электронно-библиотечной системе между ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» и ООО «ПРОСПЕКТ»;

– Научно-техническая библиотека ФГБОУ ВО РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина;

– Научно-техническая библиотека ФГБОУ ВО УГТУ (г. Ухта).

9.3. Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в т.ч. отечественного производства: Windows 8 (Лицензионное соглашение №8686341), Microsoft Office Professional Plus (Договор №1120-18 от 03 августа 2018 г.).

9.4 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в т.ч. отечественного производства: MS Office

9.5 Лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение, в т.ч. отечественного производства:  
- MS Office

## 10. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Помещения для проведения всех видов работы, предусмотренных учебным планом, укомплектованы необходимым оборудованием и техническими средствами обучения.

Таблица 10.1

№ п/п	Перечень оборудования, необходимого для освоения дисциплины/модуля	Перечень технических средств обучения, необходимых для освоения дисциплины/модуля (демонстрационное оборудование)
1	Компьютерный класс (персональные компьютеры)	Комплект мультимедийного оборудования: проектор, экран, компьютер, акустическая система. Локальная и корпоративная сеть

## 11. Методические указания по организации СРС

11.1. Методические указания по подготовке к практическим, занятиям.

На практических занятиях обучающиеся изучают методику и выполняют типовые расчеты. Для эффективной работы обучающиеся должны иметь инженерные калькуляторы и соответствующие канцелярские принадлежности. В процессе подготовки к практическим занятиям обучающиеся могут прибегать к консультациям преподавателя. Наличие конспекта лекций на практическом занятии обязательно!

Задания на выполнение типовых расчетов на практических занятиях обучающиеся получают индивидуально. Порядок выполнения типовых расчетов изложены в следующих методических указаниях:

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КУРСЕ

#### 1.1. Цель и задачи курса

Подземная гидромеханика - наука о движении жидкостей и газов в пористой среде горных пород (наука о фильтрации пластовых флюидов). Она является теоретической основой разработки нефтяных и газовых месторождений.

Целью изучения дисциплины является образование необходимой начальной базы знаний, связанных с будущей профессиональной деятельностью специалиста в области добычи нефти и газа.

Дисциплина базируется на фундаментальных знаниях студентов по курсам «Высшая математика», «Физика», «Гидравлика», «Геология», «Физика нефтяного и газового пласта». При изучении курса обеспечиваются необходимые знания по теории фильтрации, движения жидкостей и газов в пористой среде, рассматриваются задачи фильтрационных потоков в пласте, обеспечиваются возможности изучения специальных курсов: «Бурение нефтяных и газовых

скважин», «Разработка нефтяных и газовых месторождений», «Скважинная добыча нефти», «Технология и техника методов повышения нефтеотдачи пластов», «Капитальный ремонт скважин».

## **1.2. Требования к уровню освоения курса**

Студент должен знать:

- законы фильтрации нефти, газа и воды;
- основные формулы притока жидкости и газа к галерее и скважине;
- основные законы установившегося и неустойчивого движения жидкости и газа в пористой среде;
- закономерности фильтрации жидкостей и газов в трещиноватых и трещиновато-пористых средах;
- особенности фильтрации неньютоновских жидкостей.

Студент должен уметь:

- решать задачи с линейным и нелинейным законами фильтрации;
- решать задачи одномерного движения несжимаемой жидкости в пористой среде;
- решать задачи установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа в пористом, трещиновато-пористом пласте;
- выполнять расчеты установившейся фильтрации жидкости и газа в неоднородном пласте;
- применять знания о неньютоновских жидкостях к решению задач фильтрации.

## **1.3. Виды учебной работы при изучении курса и рекомендации по их выполнению**

Учебным планом направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело», (очной и заочной форм обучения) предусмотрены следующие виды учебной работы при изучении курса «Подземная гидромеханика нефтяного и газового пласта»:

- лекции;
- практические занятия;
- контрольная работа (для студентов заочной формы обучения);
- курсовая работа.

Настоящие учебно-методические указания разработаны в соответствии с Государственным учебным планом для направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (очной и заочной форм обучения). Они включают в себя следующие разделы, в которых приводятся примерная (типовая) тематика и содержание отдельных видов учебной работы:

- программа курса;
- типовые расчеты.

Так, например, в соответствии с представленной программой курса может быть составлен календарный план чтения лекций. При этом в случае нехватки лекционных часов отдельные разделы программы изучаются студентами самостоятельно. Последнее касается, в первую очередь, студентов заочной формы обучения.

В раздел «Типовые расчеты» включен ряд типовых задач из [6] с примерами их решения. Эти задачи могут быть использованы при проведении практических учебных занятий, а также в качестве расчетных заданий для студентов-заочников при выполнении ими контрольной работы.

## **2. ПРОГРАММА КУРСА**

### **2.1. Законы фильтрации пластовых флюидов**

Значение и роль подземной гидромеханики нефтяного и газового пласта в развитии научных основ разработки нефтяных и газовых месторождений. Содержание и задачи курса. Краткая характеристика этапов развития подземной гидромеханики и ее современное состояние. Теория фильтрации. Определение и особенности процесса фильтрации. Скорость фильтрации и ее связь со средней действительной скоростью движения флюида в пористой среде.

Линейный закон фильтрации Дарси. Коэффициенты фильтрации и проницаемости. Границы применимости закона Дарси. Обобщенный закон фильтрации Дарси для жидкостей, газов и газированных жидкостей.

Нелинейные законы фильтрации. Особенности фильтрации жидкостей и газов в трещиноватых и трещиновато-пористых горных породах.

Основы анализа размерностей и теории подобия. Применение методов теории размерностей при решении задач фильтрация жидкости и газа. Физическое, математическое и аналоговое моделирование процессов фильтрации пластовых флюидов. Численная и машинная модели пластовых систем.

## **2.2. Дифференциальные уравнения фильтрации жидкостей и газов**

Уравнение неразрывности (сплошности) фильтрационного потока. Дифференциальные уравнения движения флюидов в пористой среде. Уравнения состояния жидкостей, газов и пористой среды. Краевые задачи подземной гидромеханики. Прямые и обратные задачи. Допущения и упрощения, принятые при моделировании процессов, происходящих в пласте.

## **2.3. Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости**

Дифференциальное уравнение установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси. Простейшие фильтрационные потоки. Установившаяся прямолинейно-параллельная фильтрация несжимаемой жидкости в однородном пласте по линейному закону Дарси (приток жидкости к галерее). Формулы дебита, скорости фильтрации, градиента давления, распределения давления в пласте, закона движения частиц жидкости. Физическая интерпретация указанных формул. Гидродинамическое поле прямолинейно-параллельного фильтрационного потока.

Плоскорадиальная установившаяся фильтрация однородной несжимаемой жидкости по закону Дарси в однородном пласте (приток к совершенной скважине). Формулы дебита (формула Дюпюи), скорости фильтрации, градиента давления в пласте, закона движения частиц жидкости. Физическая интерпретация указанных формул.

Радиально-сферическая установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости по закону Дарси в однородном пласте. Формулы дебита, скорости фильтрации, градиента давления, распределения давления в пласте, закона движения частиц жидкости. Применение законов стационарной фильтрации несжимаемой жидкости при гидродинамических исследованиях скважин.

## **2.4. Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородных пластах**

Причины и виды неоднородности продуктивных нефтяных и газовых пластов. Установившаяся прямолинейно-параллельная и плоскорадиальная фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородных пластах (слоисто- и зонально-неоднородных). Влияние проницаемости призабойной зоны пласта и ее размеров на дебит скважины.

## **2.5. Фильтрация неньютоновской жидкости**

Особенности фильтрации неньютоновской жидкости. Реологические модели и нелинейные законы фильтрации. Влияние неньютоновского поведения нефти на процесс ее извлечения из пласта.

## **2.6. Установившийся приток жидкости к группе гидродинамически совершенных скважин**

Интерференция скважин. Представление об источниках и стоках на плоскости и в пространстве. Принцип суперпозиции фильтрационных полей. Связь между плоской задачей теории фильтрации и теорией функций комплексного переменного. Функция тока, комплексный потенциал (характеристическая функция).

Два типа задач, решаемых на плоскости функции комплексного переменного. Характеристические функции некоторых основных типов плоского потока (простейшие прямые задачи плоского фильтрационного потока). Движение жидкости в пласте к двум равнодебитным стокам (источникам). Движение жидкости в пласте от источника к стоку.

Метод конформного отображения источников и стоков. Определение дебита скважины в пласте с прямолинейным и круговым контуром питания. Оценка взаимодействия скважин. Влияние формы контура питания и непроницаемых границ на дебит скважины. Расчет дебитов жидкости из залежей полосообразной и круговой формы методом ЭГДА (метод Ю.П.Борисова).

### 2.7. Приток жидкости к несовершенным скважинам

Виды несовершенства скважин. Методы учета несовершенства скважин при расчете их дебита. Влияние радиуса и несовершенства скважины на ее дебит. Результаты решений некоторых задач притока жидкости к несовершенной скважине.

### 2.8. Установившаяся фильтрация однородной сжимаемой (упругой) жидкости и газа

Дифференциальные уравнения движения упругих (сжимаемых) жидкостей и газа в пористой, трещиновато-пористой и трещиновато-упругой пористой среде. Сведение задачи об установившемся движении сжимаемой жидкости и газа к задаче о движении несжимаемой жидкости с помощью функции Л.С.Лейбензона.

Установившееся движение упругой жидкости и газа в пористой среде, установившаяся одномерная и плоскорадиальная фильтрация сжимаемой жидкости. Установившееся параллельно-струйное и плоскорадиальное движение идеального газа в пористой среде по закону Дарси и другим законам фильтрации.

Средневзвешенное по объему пластовое давление в газовой залежи и его связь с контурным. Особенности исследований газовых скважин. Индикаторная линия. Обработка результатов исследований газовых скважин. Движение идеальных газов в пористой среде.

Установившийся одномерный поток в трещиновато-пористых пластах поток (одномерный) несжимаемой жидкости и идеального газа в формируемом трещиноватом и трещиновато-пористом пластах.

### 2.9. Установившаяся фильтрация неоднородных жидкостей (многофазных систем)

Установившееся движение неоднородных жидкостей в пористой среде, экспериментальные исследования фильтрации газированной жидкости в газах, песчаниках и карбонатных коллекторах. Движение смеси нефти и воды, газовая проницаемость пористой среды и ее зависимость от насыщенности газового пространства. Опыты Викова и Ботсета.

Установившаяся фильтрация газированной жидкости в пористой среде, функция Христиановича. Определение дебита жидкости и средневзвешенного объема пластового давления. Форма индикаторной диаграммы.

Понятие о движении трехфазных систем «вода-нефть-газ» в пористой где. Особенности фильтрации двухфазной жидкости в трещиноватой среде.

## 3. ТИПОВЫЕ РАСЧЕТЫ

### 3.1. Границы применимости закона Дарси. Нелинейные законы фильтрации

Подобно тому, как в трубной гидравлике критерием режима движения служит число Рейнольдса

$$Re = vd\rho / \mu \quad (3,1)$$

в теории фильтрации вводится безразмерный параметр

$$Re = ua\rho / \mu \quad (3,2)$$

где  $u$  - некоторая характерная скорость;  $a$  - линейный параметр, характеризующий среднее сечение поровых каналов;  $\rho$  - плотность жидкости;  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости.

Скорость фильтрации, при которой нарушается закон Дарси, называется критической скоростью фильтрации ( $u_{кр}$ ).

Однако нарушение линейного закона фильтрации еще не означает перехода от ламинарного движения к турбулентному. Закон Дарси нарушается вследствие того, что силы инерции,



возникающие в жидкости за счет извилистости каналов и изменения площади их поперечных сечений, становятся при  $u > u_{кр}$  соизмеримыми с силами трения.

В трубной гидравлике значение  $Re$ , при котором происходит смена режимов, равно  $Re_{кр} = 2320$ , в теории фильтрации закон Дарси имеет место при значении безразмерного параметра  $Re$ , меньшего критического ( $Re_{кр}$ ), которое устанавливается из опыта.

Впервые число Рейнольдса для фильтрации жидкости было введено Н.Н.Павловским в виде

$$Re = \frac{\omega d_0 \rho}{(0.75m + 0.23)\mu} \quad (3,3)$$

т. е. за характерную скорость была взята скорость фильтрации  $u$ , а линейный параметр представлен выражением

$$\bar{a} = \frac{d_0}{0.75m + 0.23} \quad (3,4)$$

Критические значения  $Re$  по Павловскому заключены в интервале

$$Re_{кр} = 7,5 - 9.$$

В.Н.Щелкачев предложил взять за линейный параметр выражение, пропорциональное корню квадратному из коэффициента проницаемости,

$$\bar{a} = 10\sqrt{k}m^{-2.3} \quad (3,5)$$

Число Рейнольдса по В.Н.Щелкачеву имеет вид

$$Re = \frac{10\omega\sqrt{k}\rho}{m^{2.3}\mu} \quad (3,6)$$

а критические значения лежат в интервале

$$1 < Re_{кр} < 12$$

По М.Д.Миллионшикову за характерную скорость взята средняя скорость движения жидкости

$$v = \frac{\omega}{m}$$

а за линейный параметр – выражение  $\sqrt{\frac{k}{m}}$ , т.е

$$Re = \frac{v\sqrt{k/m}\rho}{\mu} = \frac{\omega\sqrt{k}\rho}{m^{2.5}\mu}$$

$$0,022 < Re_{кр} < 0,29.$$

Если вычисленное по одной из формул (3.3), (3.6), (3.7) значение числа  $Re$  оказывается меньше нижнего критического значения  $Re_{кр}$ , то закон Дарси справедлив, если  $Re$  больше верхнего значения  $Re_{кр}$ , то закон Дарси заведомо нарушен.

Широкий диапазон изменения  $Re_{кр}$  объясняется тем, что формулы для числа  $Re$  входят параметры  $k$  и  $m$ , которые не полностью характеризуют микроструктуру породы. Как следует из опытов, для каждой горной породы можно указать более узкий диапазон значений  $Re_{кр}$ .

Определение режима фильтрации жидкостей и газов имеет большое практическое значение, ибо без знания закона фильтрации в пласте нельзя правильно рассчитать дебиты скважин, распределение давления в пласте, а также невозможно определение параметров пласта ( $k$ ,  $h$ ,  $m$  и др.) по данным исследования нефтяных и газовых скважин.

При нарушении закона Дарси зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления  $dp/ds$  лучше всего описывается двучленной формулой

$$\frac{dp}{ds} = a\omega + b\omega^2 \quad (3,8)$$

которая выражает плавный переход от линейного закона фильтрации к нелинейному. При малых значениях скорости  $a\omega \gg b\omega^2$  пренебрегаем вторым членом и получаем закон Дарси; при значениях  $\omega \geq \omega_{кр}$  слагаемые  $a\omega$  и  $b\omega^2$  имеют один и тот же порядок; при больших скоростях фильтрации  $a\omega \ll b\omega^2$  и можно принять

$$-\frac{dp}{ds} = b\omega^2 \quad (3,9)$$

что соответствует квадратичному закону сопротивления и имеет место при фильтрации в крупнозернистых и трещиноватых породах. Формула (3.9) называется формулой А.А. Краснопольского.

Коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются либо экспериментально, либо по формуле  $a = \mu/k$ , а  $b$  - приближенно по формуле, предложенной А.И. Ширковским

$$b = \rho \frac{63 \cdot 10^6}{(k/m)^{3/2}} \quad (3.10)$$

где  $\rho$  - плотность в  $\text{кг/м}^3$ ;  $k$  - коэффициент проницаемости в  $\text{мкм}^2$ ;  $m$  - коэффициент пористости в долях единицы.

Можно записывать закон фильтрации, отличный от закона Дарси, в виде одночленной степенной зависимости между скоростью фильтрации и градиентом давления:

$$|\omega| = C \left( \frac{dp}{ds} \text{sign} \frac{dp}{ds} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3.11)$$

где  $\text{sign}$  - знак производной  $dp/ds$ ;  $C$  и  $n$  - некоторые постоянные, определяемые опытным путем, причем  $1 < n < 2$ ,  $n=2$  соответствует закону Краснопольского.

Используя принцип однородности размерностей, можно найти выражение для коэффициента  $C$ :

$$C = \left[ \frac{\text{Re}_{кр}}{f(m)} \right]^{\frac{n-1}{n}} k^{\frac{3-n}{2n}} \mu^{\frac{n-2}{n}} \rho^{\frac{1-n}{n}} \quad (3.12)$$

где  $f(m) = 10m^{-2.3}$

### 3.2. Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости по закону Дарси

Установившийся фильтрационный поток жидкости или газа называется одномерным в том случае, когда давление и скорость фильтрации являются функциями только одной координаты, взятой по линии тока.

К простейшим одномерным фильтрационным потокам относятся:

- 1) прямолинейно - параллельный;
- 2) плоскорадиальный;
- 3) радиально - сферический.

#### 3.2.1. Прямолинейно-параллельная фильтрация жидкости (приток к галерее)

Прямолинейно-параллельная фильтрация имеет место в том случае, когда векторы скоростей фильтрации параллельны между собой.

Если пласт горизонтальный, кровля и подошва непроницаемы, толщина пласта  $h$  и ширина пласта  $B$  всюду одинаковы, то в плане пласт представится прямоугольником (рис. 5.1). Если в первом сечении пласта, соответствующем границе пласта с областью питания, поддерживается давление  $p_k$ , а в другом сечении, совпадающем, например, с дренажной галереей и отстоящем от первого

сечения на расстоянии  $l$ , поддерживается давление  $p_{\Gamma}$ . то будет установившееся прямолинейно-параллельное движение.

Направим ось  $Ox$  вдоль линии тока.

Считая, что фильтрация происходит по закону Дарси, пласт однородный по пористости и проницаемости, можем определить объемный дебит

$$Q = \frac{k(p_K - p_{\Gamma})}{\mu L} \omega \quad (3,13)$$

где  $\omega = Bh$  - площадь сечения пласта, нормального к направлению движения.

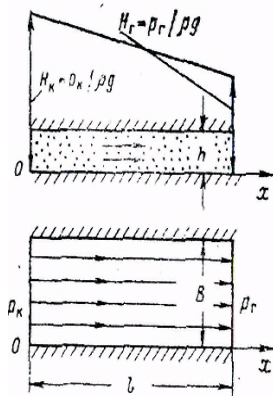


Рис.3.1

Давление в любом сечении пласта

$$p = p_K - \frac{p_K - p_{\Gamma}}{l} x \quad (3,14)$$

и время, в течение которого частицы пройдут путь  $x$ ,

$$t = \frac{m \mu l x}{k(p_K - p_{\Gamma})} \quad (3,15)$$

### 3.2.2. Плоскорадиальное напорное движение несжимаемой жидкости. Приток к совершенной скважине.

#### Формула Дюпюи

При плоскорадиальном движении векторы скорости фильтрации направлены по радиусам к оси скважины, поэтому давление и скорость фильтрации зависят только от одной координаты  $r$ . При этом во всех горизонтальных плоскостях поле скоростей и давлений будет одинаковым.

Примером плоскорадиального фильтрационного потока является приток к гидродинамически совершенной скважине, вскрывшей горизонтальный пласт бесконечной протяженности на всю толщину  $h$  и сообщающейся с пластом через полностью открытую боковую поверхность цилиндра, отделяющую ствол скважины от продуктивного пласта.

Поток будет также плоскорадиальным при притоке к совершенной скважине радиуса  $r_c$  (или оттоке от скважины), расположенной в центре ограниченного горизонтального цилиндрического пласта толщиной  $h$  и радиусом  $R_K$  (рис.3. 2).

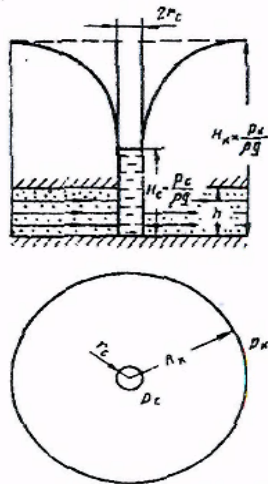


Рис.3.2

Если на внешней границе пласта, совпадающей с контуром питания, поддерживается постоянное давление  $p_k$ , а на забое скважины постоянное давление  $p_c$ , пласт однороден по пористости и проницаемости, фильтрация происходит по закону Дарси, то объемный дебит скважины определится по формуле Дюпюи:

$$Q = \frac{2\pi kh(p_k - p_c)}{\mu \ln \frac{R_k}{r_c}} \quad (3.16)$$

где  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости.

Закон распределения давления определяется по одной из формул:

$$p = p_k - \frac{p_k - p_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \ln \frac{R_k}{r} \quad (3.17)$$

либо

$$p = p_k - \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_k}{r} \quad (3.18)$$

либо

$$p = p_c + \frac{p_k - p_c}{\ln \frac{R_k}{r_c}} \ln \frac{r}{r_c} \quad (3.19)$$

Линия  $p = p(r)$  называется депрессионной кривой давления. Характерно, что при приближении к скважине градиенты давления и скорости фильтрации рис.3.2 резко возрастают. При построении карты изобар следует учитывать, что радиусы изобар изменяются в геометрической прогрессии, в то время как давление на изобарах изменяется в арифметической прогрессии.

Индикаторная линия - зависимость дебита скважины от депрессии  $\Delta p = p_k - p_c$  при притоке к скважине в условиях справедливости закона Дарси представляет собой прямую линию, определяемую уравнением  $Q = K\Delta p$ .

Коэффициент продуктивности

$$K = \frac{2\pi kh}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.20)$$

численно равен дебиту при депрессии, равной единице.

Закон движения частиц вдоль линии тока, если при  $t=0$  частица находилась в точке с координатой  $r=r_0$ , описывается уравнением

$$t = \frac{\pi h m}{Q} (r_0^2 - r^2) \quad (3.21)$$

или

$$t = \frac{m \mu \ln \frac{R_K}{r_C} (r_0^2 - r^2)}{2k(p_K - p_C)} \quad (3.21, a)$$

Средневзвешенное по объему порового пространства  $Q$  пластовое давление

$$p = \frac{1}{\Omega} \int p d\Omega \quad (3.22)$$

где

$$\Omega = \pi(R_K^2 - r_C^2)hm$$

$$d\Omega = 2\pi h m r dr$$

Подставляя выражение для  $p$  (5.17), выполняя интегрирование и пренебрегая всеми членами, содержащими  $r_C^2$ , получим

$$\tilde{p} = p_K - \frac{p_K - p_C}{2 \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.23)$$

Закон распределения давления и формула дебита при нарушении закона Дарси при притоке к совершенной скважине получаются из двучленной формулы

$$-\frac{dp}{ds} = \frac{dp}{dr} = \frac{\mu}{k} \omega + b\omega^2 \quad (3.24)$$

Подставляя выражение для скорости фильтрации

$$\omega = Q / 2\pi r h$$

в (3.24) и разделяя переменные, получим

$$dp = \frac{Q\mu}{2\pi k h} \frac{dr}{r} + \frac{Q^2 \mu}{(2\pi h)^2} \frac{dr}{r^2} \quad (3.25)$$

Интегрируя по  $p$  в пределах от  $p_C$  до  $p_K$  и по  $r$  в пределах от  $r_C$  до  $R_K$  будем иметь

$$p_K - p_C = \frac{Q\mu}{2\pi k h} \ln \frac{R_K}{r_C} + \frac{Q^2 \mu}{(2\pi h)^2} \left( \frac{1}{r_C} - \frac{1}{R_K} \right) \quad (3.26)$$

Решая полученное квадратное уравнение, находим дебит скважины  $Q$ . Интегрируя (3.25) по  $p$  в пределах от  $p_c$  до  $p_k$  и по  $r$  в пределах от  $r_c$  до  $R_k$ , найдем закон распределения давления

$$p = p_k - \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_k}{r} + \frac{Q^2 \mu}{(2\pi h)^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_k} \right) \quad (3.27)$$

Как видно из (3.26), индикаторная линия при нарушении закона Дарси является параболой.

Если фильтрация происходит по закону Краснопольского, то дебит определяется по формуле

$$Q = 2\pi h \sqrt{\frac{r_c}{b} \Delta p} \quad (3.28)$$

### 3.2.3. Радиально-сферическая фильтрация несжимаемой жидкости по закону Дарси

Фильтрационный поток называется радиально-сферическим, если векторы скорости фильтрации направлены в пространстве по прямым, радиально сходящимся к одной точке (или расходящимся от нее).

Благодаря центральной симметрии давление и скорость фильтрации зависят и в этом случае только от одной координаты  $r$ , отсчитываемой от центра (рис.3.3).



Рис.3.3

Примером потока, весьма близкого к радиально-сферическому, является приток жидкости к гидродинамически несовершенной скважине малого диаметра, едва вскрывшей непроницаемую горизонтальную кровлю однородного пласта большой мощности (теоретически бесконечной).

Если на забое скважины, представленной в виде полусферы радиуса  $r_c$ , поддерживается постоянное приведенное давление  $p_c$ , а на достаточно большом расстоянии от скважины, на полусферической поверхности радиуса  $R_k$ , сохраняется постоянное давление  $p_k$  и фильтрация в однородном пласте происходит по закону Дарси, то объемный дебит скважины определяется по формуле

$$Q = \frac{2\pi r_c k (p_k^* - p_c^*)}{\mu} \quad (3.29)$$

Приведенное давление в любой точке пласта определяется по формуле

$$p^* = p_k^* - \frac{p_k^* - p_c^*}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_k}} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R_k} \right) \quad (3.30)$$

а закон движения частиц вдоль линии тока от точки с координатой  $r_0$  до точки с координатой  $r$  описывается уравнением

$$t = \frac{2\pi m}{3Q} (r_0^3 - r^3) \quad (3.31)$$

### 3.3. Установившийся приток жидкости к группе гидродинамически совершенных скважин. Интерференция скважин. Связь плоской задачи теории фильтрации с теорией функций комплексного переменного

В самом общем случае давление и скорость фильтрации зависят от трех координат точки в пласте. Если давление и скорость фильтрации зависят только от двух координат, то в каждой плоскости, перпендикулярной к третьей оси, поле скоростей и давлений будет одинаковым. В этом случае фильтрационный поток называется плоским. Плоский фильтрационный поток имеет место при работе одной или нескольких гидродинамически совершенных (эксплуатационных и нагнетательных) скважин в однородном горизонтальном пласте постоянной толщины. Именно такие потоки будут рассмотрены в настоящем разделе.

#### 3.3.1. Потенциал точечного стока и источника на плоскости. Принцип суперпозиции

Назовем точечным стоком на плоскости точку, поглощающую жидкость. Сток можно рассматривать как гидродинамически совершенную эксплуатационную скважину бесконечно малого радиуса в пласте единичной толщины. Точечный источник - это точка, выделяющая жидкость (аналог нагнетательной скважины). Заменяя источники и стоки скважинами конечного диаметра, мы практически не допускаем никакой ошибки, поэтому будем в дальнейшем отождествлять скважины с источниками и стоками.

При работе в бесконечном пласте одной скважины-стока фильтрация будет плоскорадиальной и давление в точке на расстоянии  $r$  от центра скважины определяется по формуле

$$p = \frac{q\mu}{2\pi k} \ln r + C \quad (3.32)$$

где  $q=Q/h$  -дебит скважины-стока, приходящийся на единицу мощности пласта;  $C$  - постоянная интегрирования.

Назовем потенциалом скорости фильтрации  $\Phi$  выражение  $\Phi=kp/u$ . Переходя от давления к потенциалу, получим значение потенциала в точке на расстоянии  $r$  от центра скважины

$$\Phi = \frac{q}{2\pi} \ln r + C \quad (3.33)$$

Дебиту источника (нагнетательной скважины) приписывается знак минус.

При совместной работе в пласте нескольких скважин результирующий потенциал в любой точке пласта  $M$  равен алгебраической сумме потенциалов  $\Phi, \Phi_2, \dots$ , обусловленных работой каждой отдельной скважины.

$$\Phi = \frac{q_1}{2\pi} \ln r_1 + \frac{q_2}{2\pi} \ln r_2 + \frac{q}{2\pi} \ln r_3 + \dots + C = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n q_i \ln r_i + C \quad (3.34)$$

Скорости фильтрации при этом складываются геометрически (рис.3.4,а, б). Это называется принципом суперпозиции, или сложения течений.

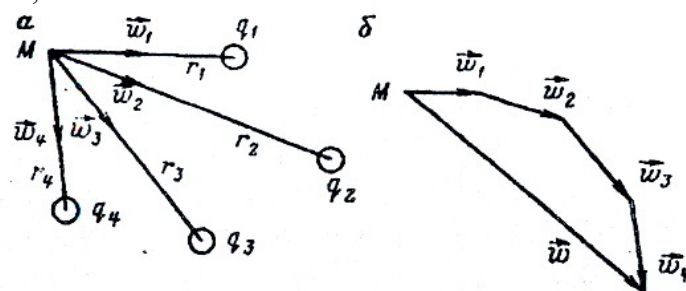


Рис.3.4

Используя принцип суперпозиции, можно приближенно рассчитывать дебиты или забойные потенциалы (а следовательно, и забойные давления) для группы скважин, работающих в пласте с весьма удаленным контуром питания. Потенциал  $\Phi_K$  на контуре питания считается известным, а расстояние от контура питания до всех скважин - одно и то же и приблизительно равно  $R_K$ .

Помещая мысленно точку  $M$  последовательно на забой каждой скважины, где  $\Phi_M = \Phi_{C2}$ , получим из общего уравнения (3.34) систему  $n$  уравнений ( $n$  - число скважин). Постоянная интегрирования находится из условия на контуре питания. Окончательно система уравнений для определения дебитов или забойных потенциалов примет вид

$$\begin{aligned} \Phi_K - \Phi_{C_1} &= \frac{1}{2\pi} \left( q_1 \ln \frac{R_K}{r_{C_1}} + q_2 \ln \frac{R_K}{r_{12}} + \dots + q_n \ln \frac{R_K}{r_{1n}} \right) \\ \Phi_K - \Phi_{C_2} &= \frac{1}{2\pi} \left( q_1 \ln \frac{R_K}{r_{12}} + q_2 \ln \frac{R_K}{r_{C_2}} + \dots + q_n \ln \frac{R_K}{r_{2n}} \right) \\ &\dots\dots\dots \\ \Phi_K - \Phi_{C_n} &= \frac{1}{2\pi} \left( q_1 \ln \frac{R_K}{r_{1n}} + q_2 \ln \frac{R_K}{r_{2n}} + \dots + q_n \ln \frac{R_K}{r_{C_n}} \right) \end{aligned} \quad (3.35)$$

здесь  $r_{ij}$  - расстояние между центрами  $i$ -й и  $j$ -й скважин.

Принцип суперпозиции можно использовать, если скважины работают в пласте, ограниченном контуром питания той или иной формы, или непроницаемыми границами (линии выклинивания, сбросы), но для выполнения тех или иных условий на границах приходится вводить фиктивные скважины за пределами пласта, которые создают в совокупности с реальными скважинами необходимые условия на границах.

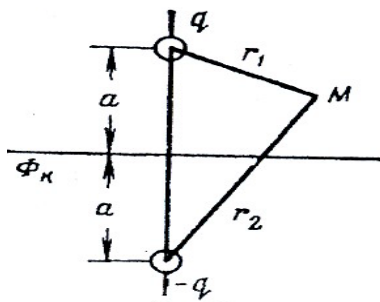


Рис.3.5

При этом задача сводится к рассмотрению одновременной работы реальных и фиктивных скважин в неограниченном пласте. Этот метод называется методом отображения источников и стоков (методом конформного отображения). Он широко применяется не только в подземной гидравлике и гидродинамике, но и при решении задач теории электричества, магнетизма и электропроводности.

Так, если эксплуатационная скважина находится в пласте с прямолинейным контуром питания на расстоянии  $a$  от контура, то ее надо зеркально отобразить относительно контура, т.е. поместить фиктивную скважину с другой стороны от контура на расстоянии  $a$  (рис.3.5) и считать ее дебит отрицательным (скважина — источник). При этом потенциал в любой точке  $M$  равен

$$\Phi_M = \frac{q}{2\pi} \ln r_1 - \frac{q}{2\pi} \ln r_2 + C = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_1}{r_2} + C$$

на контуре питания  $r_1 = r_2$  и  $\Phi = C = \Phi_K$ , а дебит скважины определяется по формуле

$$Q = \frac{2\pi h (\Phi_K - \Phi_C)}{\ln \frac{2a}{r_C}} = \frac{2\pi k h (p_K - p_C)}{\mu \ln \frac{2a}{r_C}} \quad (3.36)$$



Метод отображения источников и стоков используется также для нахождения дебита скважины, работающей в пласте, ограниченном пересекающимися прямолинейными непроницаемыми границами. При помощи этого метода можно определить дебит скважины, эксцентрично расположенной в круговом пласте

$$Q_{\text{ЭКСЦ}} = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \ln \left[ \frac{R_K}{r_C} \left( 1 - \frac{\delta^2}{R_K^2} \right) \right]} \quad (3.37)$$

где  $\delta$  - расстояние от центра скважины до центра кругового пласта (эксцентриситет).

### 3.3.2. Интерференция скважин

Дебит каждой скважины бесконечной цепочки, расположенной на расстоянии  $L$  от прямолинейного контура питания (рис.3.6), выражается формулой

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_K - \Phi_C)}{\ln 2sh \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_C}} = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \left( \ln 2sh \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_C} \right)} \quad (3.38)$$

где  $\sigma$  - половина расстояния между скважинами.

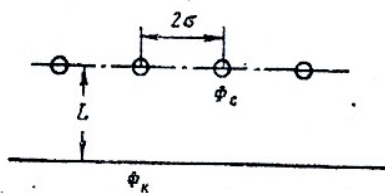


Рис.3.6

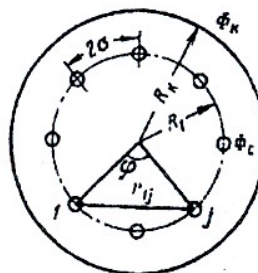


Рис.3.7

Если  $L > \sigma$ , то приближенно можно принять, что

$$\ln 2sh \frac{\pi L}{\sigma} = \ln \left( e^{\frac{\pi L}{\sigma}} - e^{-\frac{\pi L}{\sigma}} \right) \approx \frac{\pi L}{\sigma}$$

и тогда

$$Q = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \left( \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_C} \right)}$$

Дебит одной скважины кольцевой батареи, состоящей из  $n$  скважин, в круговом пласте радиуса  $R_K$  (рис.5.7) имеет вид

$$Q = \frac{2\pi h(\Phi_K - \Phi_C)}{\ln \left[ \frac{R_K^n}{nr_C R_1^{n-1}} \left( 1 - \frac{R_1^{2n}}{R_K^{2n}} \right) \right]} = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \left[ \frac{R_K^n}{nr_C R_1^{n-1}} \left( 1 - \frac{R_1^{2n}}{R_K^{2n}} \right) \right]} \quad (3.40)$$

где  $R_K$  - радиус батареи;  $r_C$  - радиус скважин.

Если число скважин батареи велико (больше пяти или шести), то  $(R_1 / R_K)^{2n} \ll 1$

и этим выражением можно пренебречь по сравнению с единицей; если, кроме того, заменить  $\frac{R_1}{nr_c} = \frac{\sigma}{\pi r_c}$  получим приближенную формулу

$$Q = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \left( n \ln \frac{R_K}{R_1} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_C} \right)} \quad (3.41)$$

### 3.3.3. Метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений Ю.П.Борисова

Одним из методов расчета дебитов многорядных батарей или цепочек скважин является метод эквивалентных фильтрационных сопротивлений Ю. П. Борисова.

Суммарный дебит цепочки из  $n$  скважин равен

$$Q' = \frac{2\pi khn(p_K - p_C)}{\mu \left( \frac{\pi L}{\sigma} + \ln \frac{\sigma}{\pi r_C} \right)} = \frac{p_K - p_C}{\frac{\mu L}{kh2\sigma n} + \frac{\mu}{2\pi khn} \ln \frac{\sigma}{\pi r_C}} \quad (3.42)$$

Используя электрогидродинамическую аналогию и учитывая, что аналогом объемного расхода является сила тока, а аналогом разности давлений - разность электрических потенциалов, выражение, стоящее в знаменателе, можно назвать фильтрационным сопротивлением. Оно складывается из внешнего фильтрационного сопротивления

$$\rho = \frac{\mu L}{kh2\sigma n} = \frac{\mu L}{khB} \quad (3.43)$$

которое представляет собой сопротивление потоку от контура питания до галереи длиной  $B=2\sigma n$ , расположенной на расстоянии  $L$  от контура питания, и из внутреннего фильтрационного сопротивления

$$\rho' = \frac{\mu}{2\pi khn} \ln \frac{\sigma}{\pi r_C} \quad (3.44)$$

которое выражает собой сопротивление, возникающее при подходе жидкости к скважинам в зоне радиуса  $\sigma/\pi$ , где фильтрация практически плоскорадиальная.

Формула (5.42) примет вид

$$Q = \frac{p_K - p_C}{\rho - \rho'} \quad (3.45)$$

Электрическая схема, соответствующая последней формуле, представляет собой два последовательно соединенных проводника с сопротивлениями  $\rho$  и  $\rho'$ , с разностью потенциалов  $p_K$  и  $p_C$ , и силой тока  $Q'$  (рис.3.8).

Если в пласте имеется три цепочки с числом скважин  $n_1, n_2, n_3$  в каждой, с радиусами  $r_{c1}, r_{c2}, r_{c3}$ , с забойными давлениями  $p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}$  и суммарными дебитами  $Q'_1, Q'_2, Q'_3$  соответственно, то схема эквивалентных фильтрационных сопротивлений будет разветвленной (рис.3.9), так как общее количество жидкости, поступающее от контура питания, в дальнейшем разделяется: дебит  $Q'_1$  перехватывается первой цепочкой, а оставшаяся жидкость двигается дальше, затем дебит  $Q'_2$  перехватывается второй цепочкой и т. д.

В этом случае внешние фильтрационные сопротивления будут:

$$\rho_1 = \frac{\mu L_1}{khB}, \quad \rho_2 = \frac{\mu L_2}{khB}, \quad \rho_3 = \frac{\mu L_3}{khB}, \quad (3.45)$$

где  $L_1$  - расстояние от контура питания до первой цепочки скважин;  $L_2$  - расстояние между первой и второй цепочками;  $L_3$  - между второй и третьей.

Внутренние сопротивления определяются по формулам:

$$\rho'_1 = \frac{\mu}{2\pi kh n_1} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{c1}}$$

$$\rho'_2 = \frac{\mu}{2\pi kh n_2} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{c2}}$$

$$\rho'_3 = \frac{\mu}{2\pi kh n_3} \ln \frac{\sigma}{\pi r_{c3}} \quad (3.47)$$

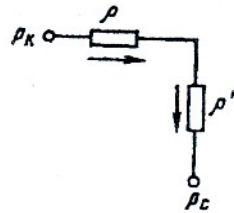


Рис.3.8

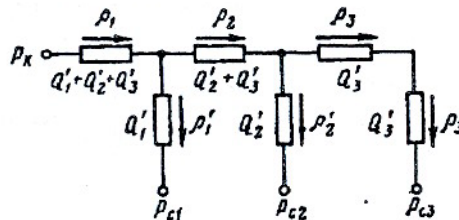


Рис.3.9

Расчет схемы проводится по законам Ома и Кирхгофа; при этом составляются алгебраические линейные уравнения по числу неизвестных (либо  $Q'_1, Q'_2, Q'_3$ , либо  $p_{c1}, p_{c2}, p_{c3}$ ).

Суммарный дебит круговой батареи скважин определяется тоже по формуле (3.45), в которой внешнее сопротивление

$$\rho = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_K}{R_1} \quad (3.48).$$

а внутреннее имеет вид (3.44).

Для этого случая схема эквивалентных фильтрационных сопротивлений будет той же, что и для прямолинейной цепочки.

В случае нескольких круговых батарей (например, трех) схема представлена на рис.3.9. При этом внешние фильтрационные сопротивления рассчитываются по формулам:

$$\rho_1 = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_K}{R_1}$$

$$\rho_2 = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_K}{R_2}$$

$$\rho_3 = \frac{\mu}{2\pi kh} \ln \frac{R_K}{R_3} \quad (3.49)$$

где  $R_1, R_2, R_3$ - радиусы батарей. Внутренние сопротивления определяются по формулам (3.47).

### 3.3.4. Связь плоской задачи теории фильтрации с теорией функций комплексного переменного

При исследовании плоского фильтрационного потока, подчиняющегося закону Дарси, можно использовать теорию функций комплексного переменного. Совместим плоскость комплексного переменного  $z = x + iy$  с основной плоскостью течения.

Для каждого плоского фильтрационного потока можно найти характеристическую функцию течения, или комплексный потенциал  $F(z)$ , который является функцией комплексного переменного  $z$ . В функции  $F(z)$  можно отделить действительную часть от мнимой:

$$F(z) = \Phi(x, y) + i\psi(x, y), \quad (3.50)$$

где  $\Phi(x, y)$  - потенциал скорости;  $\psi(x, y)$  - функция тока. Эти функции связаны между собой уравнениями Коши -Римана:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= \frac{\partial \psi}{\partial y} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= -\frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \quad (3.51)$$

и подчиняются уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0 \quad (3.52)$$

Уравнение  $\Phi(x, y) = c$  определяет собой семейство эквипотенциалей,

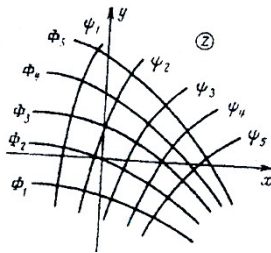


Рис.3.10

совпадающих с изобарами, так как,  $\Phi = \frac{k}{\mu} p$  а  $\psi(x, y) = c$  – семейство линий тока.

Эквипотенциалы и линии тока взаимно ортогональны (рис.3.10).

Проекции скорости фильтрации на координатные оси находятся по формулам:

$$\omega_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad \omega_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (3.53)$$

а модуль скорости фильтрации

$$\omega = \left| \frac{dF}{dz} \right| = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (3.54)$$

Время движения частицы жидкости вдоль линии тока  $s$  можно определить по формуле

$$t = -m \int \frac{dz}{s \frac{dF}{dz}} \quad (3.55)$$

где  $z = x-iy$  - сопряженное с  $z$  комплексное переменное.

Если какой-либо сложный плоский фильтрационный поток можно представить как результат наложения нескольких простейших потоков, то характеристическая функция сложного потока равна по принципу суперпозиции алгебраической сумме характеристических функций простейших потоков.

### 3.4. Влияние гидродинамического несовершенства скважины на ее дебит

Скважина называется гидродинамически совершенной, если она вскрывает пласт на всю толщину и забой скважины открытый, т. е. вся вскрытая поверхность забоя является фильтрующей поверхностью. Поток жидкости к совершенной скважине — плоский фильтрационный поток. Если скважина с открытым забоем вскрывает пласт не на всю толщину, а только на некоторую величину, или если скважина сообщается с пластом через отдельные отверстия, то фильтрация жидкости или газа будет пространственной (трехмерной), а скважина — гидродинамически несовершенной.

Различают три вида несовершенства скважин:

- 1) скважина гидродинамически несовершенная по степени вскрытия пласта — это скважина с открытым забоем, вскрывшая пласт не на всю мощность;
- 2) скважина гидродинамически несовершенная по характеру вскрытия пласта — скважина, вскрывающая пласт от кровли до подошвы, но сообщаемая с пластом через отверстия в колонне труб, в цементном кольце или в специальном фильтре;
- 3) скважина гидродинамически несовершенная как по степени вскрытия пласта, так и по характеру вскрытия.

Дебит скважины, несовершенной по степени вскрытия, можно определить по

формуле М.Маскета, если радиус пласта  $R_k \geq \frac{1}{2}h$

$$Q = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu\xi} \quad (3.61)$$

где

$$\xi = \frac{1}{2h} \left[ 2 \ln \frac{4h}{r_C} - \varphi(\bar{h}) \right] - \ln \frac{4h}{R_K} \quad (3.62)$$

и относительное вскрытие пласта  $\bar{h} = b/h$ .

Функция  $\varphi(\bar{h})$  имеет следующее аналитическое выражение:

$$\varphi(\bar{h}) = \ln \frac{\Gamma(0,875\bar{h}) \cdot \Gamma(0,125\bar{h})}{\Gamma(1 - 0,875\bar{h}) \cdot \Gamma(1 - 0,125\bar{h})} \quad (3.63)$$

где  $\Gamma$  - интеграл Эйлера второго рода или иначе, гамма-функция, для которой имеются таблицы в математических справочниках;  $\varphi(\bar{h})$  представлена графически на рис.3.16.

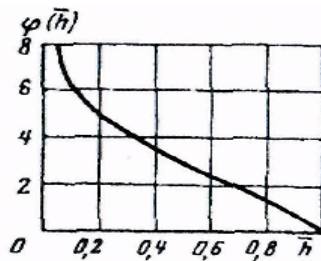


Рис.3.11

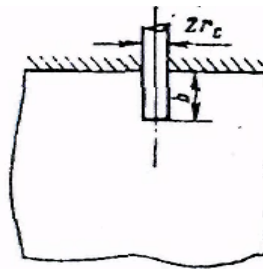


Рис.3.12

Для скважины в пласте бесконечной толщины (рис.5.11) можно найти дебит при помощи формулы Н.К.Гиринского:

$$Q = \frac{2\pi kb(p_K - p_C)}{\mu \ln \frac{1,6b}{r_C}} \quad (3.64)$$

Дебит скважины гидродинамически несовершенной как по степени, так и по характеру вскрытия пласта можно подсчитать по формуле

$$Q = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \left( \ln \frac{R_K}{r_C} + C_1 + C_2 \right)} \quad (3.65)$$

где  $C_1$  - безразмерная величина, определяющая дополнительное фильтрационное сопротивление, обусловленное несовершенством скважины по степени вскрытия пласта;  $C_2$  - безразмерная величина, определяющая дополнительное фильтрационное сопротивление, вызванное несовершенством скважины по характеру вскрытия пласта.

$C_1$  и  $C_2$  находятся из графиков В.И.Щурова, построенных по данным исследования притока жидкости к скважинам с двойным видом несовершенства на электролитических моделях.

Величина  $C_1$  представлена на рис.3.13 в зависимости от параметров  $a = h/D_c$  и  $\bar{h} = b/h$ .

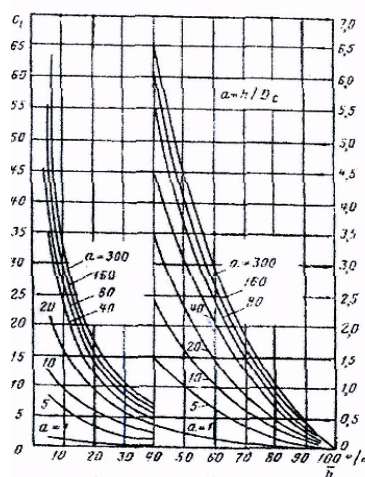


Рис.3.13

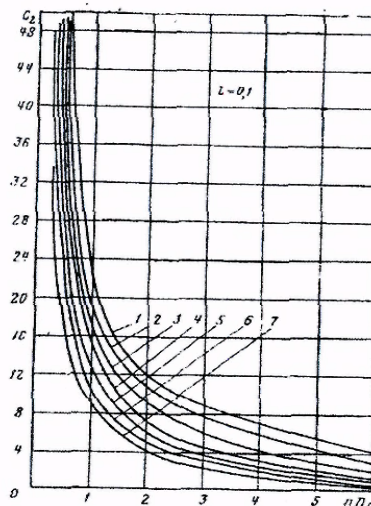


Рис.3.14

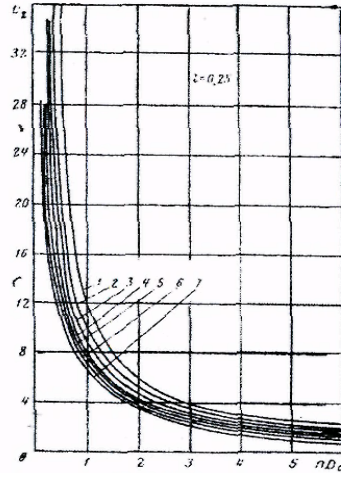


Рис.3.15

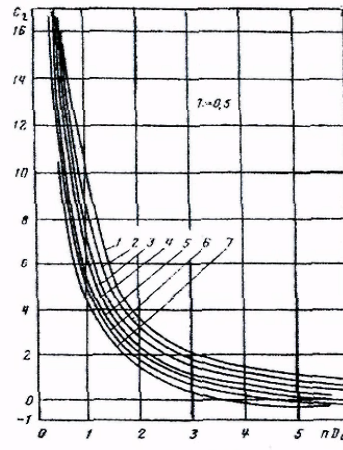


Рис.3.16

На рис.3.14, 3.15, 3.16 дана зависимость  $C_2$  от трех параметров:  $nD_c$ ,  $l=\Gamma/D_c$  и  $a=d_0/D_c$ , где  $n$  - число перфорационных отверстий на 1 м;  $D_c$  - диаметр, скважины в м;  $\Gamma$  - глубина проникновения пуль в породу;  $d_0$  - диаметр отверстий.

Соответствие между кривыми и значениями параметра  $a=d_0/D$  видно из следующих данных:

Номер кривой	1	2	3	4	5	6	7
$a$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09

Формулу (3.65) можно записать иначе, введя в нее приведенный радиус скважины

$$r_c = r_c \cdot e^{-(C_1+C_2)} = r_c \cdot e^C$$

т.е. радиус такой совершенной скважины, которой равен дебиту несовершенной скважины. В литературе приводятся графики  $\delta$ , которые можно использовать для оценки  $C$ .

$$Q = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \ln \frac{R_K}{r_c}} \quad (3.67)$$

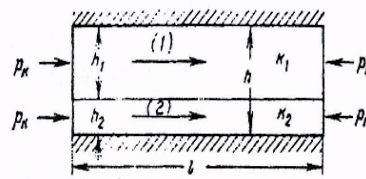


Рис.3.17

Иногда гидродинамическое несовершенство скважин учитывается при помощи коэффициента совершенства скважины

$$\delta = \frac{Q}{Q_{COB}} \quad (3.68)$$

где  $Q$  - дебит несовершенной скважины;  $Q_{COB}$  - дебит совершенной скважины в тех же условиях. Коэффициент совершенства скважины  $\delta$  и величина  $C=C_1+C_2$  связаны между собой зависимостью

$$\delta = \frac{\ln \frac{R_K}{r_C}}{\ln \frac{R_K}{r} + C} \quad (3.69)$$

или

$$C = \left( \frac{1}{\delta} - 1 \right) \ln \frac{R_K}{r_C} \quad (3.70)$$

### 3.5. Установившаяся фильтрация несжимаемой жидкости в неоднородных пластах

Проницаемость в различных точках продуктивных пластов не является строго постоянной величиной. Иногда изменение проницаемости по пласту носит столь хаотичный характер, что пласт можно рассматривать в среднем однородно проницаемым.

Если изменение проницаемости носит не случайный характер, а на значительном протяжении пласта имеют место определенные закономерности в изменении проницаемости, тогда движение жидкостей и газов существенно отличается от движения их в однородных пластах.

Отметим следующие простейшие случаи неоднородности пластов.

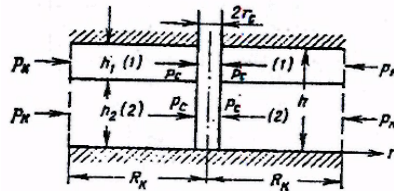


Рис.3.18

1. Пласт состоит из нескольких слоев (рис.3.18, 3.19). В пределах каждого слоя проницаемость в среднем одинакова и скачкообразно изменяется при переходе от одного слоя к другому. Допустим, что все  $n$  слоев горизонтальны, толщина  $i$ -го слоя  $h_i$ , проницаемость соответствующего слоя  $k_i$ . На одном конце каждого слоя давление равно  $p_K$ , на другом –  $p_\Gamma$ .

Если движение жидкости прямолинейно-параллельное (см. рис.3.18) по закону Дарси, то распределение давления  $p$  в каждом слое линейное и характеризуется уравнением

$$p = p_K - \frac{p_K - p_\Gamma}{L} x \quad (3.71)$$

дебит потока вычисляется по формуле

$$Q = \frac{B(p_K - p_\Gamma)}{\mu L} \sum_{i=1}^n k_i h_i \quad (3.72)$$

а средний коэффициент проницаемости по формуле

$$k_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (3.73)$$

В случае плоскорадиального движения жидкости в многослойном пласте к гидродинамически совершенной скважине по закону Дарси (см. рис.3.23) давление в каждом слое меняется по логарифмическому закону



$$p = p_K - \frac{p_K - p_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{R_K}{r} \quad (3.74)$$

дебит скважины определяется по формуле

$$Q = \frac{2\pi(p_K - p_C)}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \sum_{i=1}^n k_i h_i \quad (3.75)$$

а средний коэффициент проницаемости пласта и в этом случае находится по (3.73).

2. Пласт состоит из нескольких зон различной проницаемости (рис.3.19, 3.20). На границе двух зон проницаемость меняется скачкообразно; в пределах одной и той же зоны проницаемость в среднем одинакова. С неоднородностью такого рода можно встретиться, например, при соприкосновении двух разных пластов вдоль сброса или в случае наличия порога радиальной изменчивости одного и того же пласта.

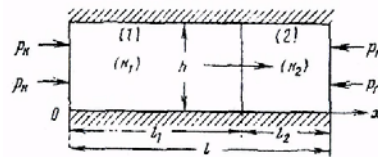


Рис.3.19

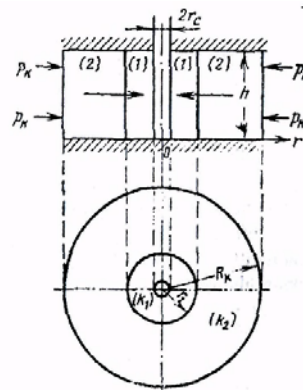


Рис.3.20

Допустим, что горизонтальный пласт толщиной  $h$ , длиной  $l$  с непроницаемыми кровлей и подошвой состоит из  $n$  зон различной проницаемости. Длина  $i$ -й зоны  $l_i$ , коэффициент проницаемости  $k_i$  (см. рис.3.19).

При прямолинейно-параллельной фильтрации жидкости в таком пласте по закону Дарси дебит фильтрационного потока подсчитывается по формуле

$$Q = \frac{Bh(p_K - p_\Gamma)}{\mu \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}} \quad (3.76)$$

где  $B$  - ширина потока.

Средний коэффициент проницаемости

$$k_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{k_i}} \quad (3.77)$$

При  $n=2$  распределение давления в первой зоне  $p_1$ , и во второй -  $p_2$  описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
p_1 &= p_K - \frac{(p_K - p_\Gamma)k_2}{l_1k_2 + l_2k_1} x & 0 \leq x \leq l_1 \\
p_2 &= p_K - \frac{(p_K - p_\Gamma)k_1}{l_1k_2 + l_2k_1} (l - x) & l_1 \leq x \leq l.
\end{aligned} \quad (3.78)$$

Если при плоскорадиальном притоке жидкости к гидродинамически совершенной скважине по закону Дарси зоны различной проницаемости пласта имеют кольцеобразную форму (см. рис.3.19), то формула дебита скважины имеет вид

$$Q = \frac{2\pi h(p_K - p_C)}{\mu \sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (3.79)$$

где  $k_i$  - коэффициент проницаемости зоны за номером  $i$ ;  $r_{i-1}$  и  $r_i$  -соответственно внутренний и внешний радиусы этой зоны, причем  $r_0 = r_c$ , а  $r_n = R_K$ .

Средний коэффициент проницаемости в этом случае находится по формуле

$$k_{cp} = \frac{\ln \frac{R_K}{r_c}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} \quad (3.80)$$

При  $n=2$  распределение давления в первой зоне  $p_1$ , и во второй зоне  $p_2$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned}
p_1 &= p_C + \frac{(p_K - p_C) \ln \frac{r}{r_c}}{\ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{k_1}{k_2} \ln \frac{R_K}{r_1}} & r_c \leq r \leq r_1 \\
p_2 &= p_C + \frac{\frac{k_1}{k_2} (p_K - p_C) \ln \frac{r}{R_K}}{\ln \frac{r_1}{r_c} + \frac{k_1}{k_2} \ln \frac{R_K}{r_1}} & r_1 \leq r \leq R_K
\end{aligned} \quad (3.81)$$

3. Проницаемость пласта непрерывно изменяется, увеличиваясь или уменьшаясь в каком-либо направлении. Допустим, что при плоскорадиальном течении коэффициент проницаемости изменяется по линейному закону

$$k_{cp} = a + br = \frac{k_C R_K - k_0 r_C}{R_K - r_C} + \frac{k_0 - k_C}{R_K - r_C} r$$

У забоя скважины коэффициент проницаемости равен  $k_c$ , а на контуре питания ( $r=R_K$ )  $k = k_0$ . Фильтрация жидкости происходит по закону Дарси. В этом случае формула для дебита имеет вид

$$Q = \frac{2\pi h(p_K - p_C)}{\mu \int_{r_C}^{R_K} \frac{dr}{rk(r)}} = \frac{2\pi h(p_K - p_C)(k_C R_K - k_0 r_C)}{\mu(R_K - r_C) \left( \ln \frac{R_K}{r_C} + \ln \frac{k_C}{k_0} \right)} \quad (3.82)$$

### 3.6.1. Аналогия между установившейся фильтрацией сжимаемой жидкости (газа) и несжимаемой жидкости.

#### Функция Лейбензона

При установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа массовый расход во всех поперечных сечениях пласта одинаков

$$Q_m = const, \quad (3.83)$$

а объемный расход возрастает по мере падения давления за счет расширения жидкости или газа. Назовем функцию

$$P = \int \rho dp + C \quad (3.84)$$

функцией Л.С. Лейбензона.

Целесообразность введения этой функции видна из сопоставлений формул, выражающих закон Дарси в дифференциальной форме для несжимаемой жидкости

$$Q = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{ds} \omega(s), \quad (3.85)$$

где  $Q$  - постоянный объемный расход жидкости, и для сжимаемой жидкости или газа

$$Q = -\frac{k}{\mu} \rho \frac{dp}{ds} \omega(s) = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{ds} \omega(s), \quad (3.86)$$

где  $Q_m$  - постоянный массовый расход;  $dP = \rho dp$  - дифференциал функции Лейбензона.

Выражения (3.85) и (3.86) являются однотипными дифференциальными уравнениями, в которых объемному расходу  $Q$  в уравнении (3.85) соответствует массовый расход  $Q_m$  в формуле (3.86), а давлению в (3.85) - функция Лейбензона в (3.86).

Отсюда следует вывод, что все формулы, полученные для установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси, можно использовать при установившейся фильтрации сжимаемой жидкости и газа при тех же граничных условиях со следующей заменой переменных:

Несжимаемая жидкость	Сжимаемая жидкость или газ
Объемный расход $Q$	Массовый расход $Q_m$
Давление $p$	Функция Лейбензона $P$
Объемная скорость фильтрации $\omega$	Массовая скорость фильтрации $\rho\omega = Q_m/\omega$

### 3.6.2. Установившаяся фильтрация сжимаемой жидкости

Для сжимаемой капельной жидкости, следующей закону Гука, уравнение состояния, выражающее зависимость плотности жидкости от давления, определяется соотношением

$$\rho = \rho_0 e^{\beta_{ж}(p-p_0)} = \rho_0 e^{\frac{p-p_0}{K_{ж}}} \quad (3.87)$$

где  $\beta_{ж}$  - коэффициент объемного сжатия жидкости, а  $K_{ж} = 1/\beta_{ж}$ ,  $\beta_{ж}$  - модуль упругости жидкости.

Так как  $\beta_{ж}(p-p_0) \ll 1$  раскладывая в ряд  $e^{\beta_{ж}(p-p_0)}$  и ограничиваясь двумя первыми членами ряда, приближенно можно записать

$$\rho \approx \rho_0 [1 + \beta_{ж}(p - p_0)] \quad (3.88)$$

Точное значение функции Лейбензона для сжимаемой жидкости равно

$$P = \int \rho dp + C = \int \rho_0 e^{\beta_{ж}(p-p_0)} dp + C = \frac{\rho}{\beta_{ж}} + C \quad (3.89)$$

Приближенное значение функции Лейбензона

$$P = \int \rho_0 [1 + \beta_{ж}(p - p_0)] dp + C \quad (3.90)$$

Так как обычно  $\beta_{ж}(p-p_0) \ll 1$ , то можно принять

$$P \approx \rho_0 p + C \quad (3.91)$$

т. е. считать жидкость несжимаемой и рассчитывать установившееся течение по формулам, выведенным для фильтрации несжимаемой жидкости.

### 3.6.3. Установившаяся фильтрация идеального газа

Уравнение состояния идеального газа при изотермическом течении можно записать так:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{P_{am}}{\rho_{am}} = RT \quad (3.92)$$

где  $\rho_{am}$  - плотность газа при атмосферном давлении и пластовой температуре. Отсюда

$$\rho = \frac{\rho_{am} P}{P_{am}} \quad (3.93)$$

поэтому функция Лейбензона для идеального газа имеет вид

$$P = \int \rho dp + C = \int \frac{\rho_{am} P}{P_{am}} dp + C = \frac{\rho_{am} P^2}{2 P_{am}} + C \quad (3.94)$$

где  $p$  - абсолютное давление.

1. Рассмотрим параллельно-струйную фильтрацию идеального газа по закону Дарси. При параллельно-струйной фильтрации несжимаемой жидкости объемный расход определяется по формуле (3.13); используя аналогию между течением несжимаемой жидкости и газа, о которой говорилось в п.3.6.3, запишем для газа формулу массового расхода

$$Q_m = \frac{k(p_K - p_\Gamma)}{\mu} Bh \quad (3.95)$$

или с учетом (3.94)

$$Q_m = \frac{k \rho_{am} (p_K^2 - p_\Gamma^2)}{\mu 2 p_{am} l} Bh \quad (3.96)$$

Приведенным расходом  $Q_{am}$  назовем объемный расход, приведенный к атмосферному давлению и пластовой температуре:

$$Q_{am} = \frac{Q_m}{\rho_{am}} \quad (3.97)$$

Из формулы (3.96) получим

$$Q_{am} = \frac{k(p_K^2 - p_\Gamma^2)}{2 \mu \rho_{am} l} Bh \quad (3.98)$$

Заменяя в формуле (3.14), выражающей закон распределения давления при параллельно-струйной фильтрации несжимаемой жидкости,  $p$  на  $P$ , получим распределение функции Лейбензона по линейному закону

$$p = p_K - \frac{p_K - p_\Gamma}{l} x \quad (3.99)$$

и, используя формулу (3.94), - распределение давления по параболическому

$$p^2 = p_K^2 - \frac{p_K^2 - p_\Gamma^2}{l} x \quad (3.100)$$

Средневзвешенное по объему пласта давление газа равно

$$\tilde{p} = \frac{2}{3} \frac{p_K^3 - p_\Gamma^3}{p_K^2 - p_\Gamma^2} \quad (3.101)$$

2. При плоскорадиальной фильтрации газа в соответствии с формулой Дюпюи (3.16) получим формулу для массового дебита газа

$$Q_m = \frac{2\pi kh(p_K - p_C)}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.102)$$

Подставляя значение функции Лейбензона (3.96) в предыдущую формулу, найдем

$$Q = \frac{\pi kh \rho_{am} (p_K^2 - p_C^2)}{\mu \rho_{am} \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.103)$$

а выражение для объемного дебита газовой скважины, приведенного к атмосферному давлению и пластовой температуре, получим в виде

$$Q_m = \frac{2\pi kh(p_K - p_\Gamma)}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.104)$$

Заменяя в формуле (3.18)  $p$  на  $P$ , получим логарифмический закон распределения  $P$  при плоско радиальной фильтрации газа

$$p = p_K - \frac{p_K - p_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{R_K}{r} \quad (3.105)$$

откуда, используя (3.94), найдем закон распределения давления

$$p = \sqrt{p_K^2 - \frac{p_K^2 - p_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{R_K}{r}} \quad (3.106)$$

Средневзвешенное пластовое давление газа при установившейся плоскорадиальной фильтрации по закону Дарси определяется приближенно по формуле

$$\tilde{p} = p_K \left[ 1 - \frac{1 - \left( \frac{p_C}{p_K} \right)^2}{2} \left( \frac{1}{2 \ln \frac{R_K}{r_C}} - \frac{1}{\frac{R_K^2}{r_C^2} - 1} \right) \right] \quad (3.107)$$

3. В случае плоскорадиальной фильтрации идеального газа при нелинейном законе фильтрации, выраженном формулой (5.8), дебит скважины, приведенный к атмосферному давлению и пластовой температуре, определяется по формуле

$$p_K^2 - p_C^2 = \frac{\mu p_{am}}{\pi k h} \ln \frac{R_K}{r_C} Q_{am} + \frac{\beta^* \rho_{am} p_{am}}{2\pi^2 h^2} \left( \frac{1}{r_C} - \frac{1}{R_K} \right) Q_{am}^2 \quad (3.108)$$

#### 3.6.4. Установившаяся фильтрация реального газа

При больших давлениях уравнение состояния реального газа отличается от уравнения Клапейрона и имеет вид

$$\frac{p}{\rho} = zRT \quad (3.109)$$

где  $z=z(p_r, T_r)$  - коэффициент сверхсжимаемости газа, учитывающий отклонение реального газа от идеального и зависящий от приведенных давления и температуры:

$$p_{\bar{A}} = \frac{p}{p_{\bar{N}.D.E.D}}$$

$$T_r = \frac{T}{T_{CP.KP}}$$

и определяемый по графику. Здесь  $p_{cp.kp}$  и  $T_{cp.kp}$  - соответственно среднекритическое давление и среднекритическая температура. Так как природный газ состоит из различных компонентов (метан, этан, пропан и др.), то предварительно нужно вычислить значения  $p_{cp.kp}$  и  $T_{cp.kp}$  по формулам:

$$p_{CP.KP} = \frac{\sum n_j p_{kpj}}{\sum n_j}$$

$$T_{CP.KP} = \frac{\sum n_j T_{kpj}}{\sum n_j}$$

где  $n_j$  - содержание  $j$ -го компонента в газе, об. %;  $p_{kpj}$  и  $T_{kpj}$ , - критическое давление и температура  $j$ -го компонента соответственно.

Динамический коэффициент вязкости природного (реального) газа зависит от давления и температуры. Считая процесс изотермическим, нужно учитывать зависимость  $\mu(\rho)$ . На основании экспериментальных исследований построены графики, по которым с точностью до 6% можно найти значения динамического коэффициента вязкости природного газа при различных давлениях и температурах в зависимости от относительной плотности по воздуху.

Для определения массового дебита реального газа или закона распределения давления нужно записать закон Дарси для бесконечно малого элемента пласта и, учитывая зависимость  $\mu(\rho)$  и формулу (3.109), проинтегрировать его графоаналитическим методом. Если давление в пласте меняется в небольшом интервале, то можно аппроксимировать зависимость  $\rho/\mu(\rho)=\rho$  простой алгебраической функцией, взять интеграл аналитически и получить аналитическое выражение для дебита и закона распределения Давления.

11.2. Методические указания по подготовке к лабораторным работам.

Лабораторные работы учебным планом не предусмотрены

11.3. Методические указания по организации самостоятельной работы.

Самостоятельная работа обучающихся заключается в получении заданий (тем) у преподавателя для индивидуального освоения. Преподаватель на занятии дает рекомендации необходимые для освоения материала. В ходе самостоятельной работы обучающиеся должны выполнить типовые расчеты, подготовиться к выполнению экспериментов (исследований) и

изучить теоретический материал по разделам. Обучающиеся должны понимать содержание выполненной работы (знать определения понятий, уметь разъяснить значение и смысл любого термина, используемого в работе и т.п.).

#### 11.4 Методические указания к выполнению курсовой работы

##### **1. Цели и задачи выполнения курсовой работы**

Целями выполнения курсовой работы являются:

- 1) углубление и закрепление теоретических знаний, полученных студентами во время лекционных, лабораторных и практических занятий;
- 2) выработка у студентов навыков самостоятельного применения теории, привлечения дополнительных данных, анализа практических данных, оценки и проверки правильности решения;
- 3) закрепление навыков расчета с применением вычислительной техники, привлечения справочно-реферативной литературы, оформления и ведения инженерно-технической документации.

Выполнение курсовой работы направлено на решение следующих задач:

- 1) привитие навыков самостоятельной работы с учебной и научной литературой;
- 2) выработка аналитического мышления при изучении и решении поставленных вопросов и задач;
- 3) выработка умения грамотно и сжато излагать суть вопроса, поставленного в теме курсовой работы;
- 4) привитие навыков выполнения расчетов по формулам, применения системы единиц измерения СИ и других систем единиц измерения;
- 5) привитие умения делать анализ, комментировать и оценивать полученные результаты - давать физическую их интерпретацию и эмулировать выводы по проведенной работе;
- 6) привитие навыков оформления курсовой работы согласно требованиям, предъявляемым к инженерно-технической документации, в соответствии с ЕСКД.

Законченная курсовая работа должна представлять собой самостоятельную творческую работу студента.

##### **2. Содержание курсовой работы**

Курсовая работа выполняется и оформляется в соответствии с заданием, данным студенту преподавателем-консультантом, и с учетом методических указаний, изложенных в настоящем учебно-методическом пособии.

Задание на курсовую работу по выбранной теме включает в себя две основные части - теоретическую и расчетную. При этом в качестве расчетного задания могут быть использованы варианты типовых задач, приведенных в разделе 5 настоящего учебного пособия.

По курсовой работе студент оформляет расчетно-пояснительную записку, рекомендуемое содержание которой может иметь следующую структуру:

1. Введение.
2. Цель и задачи курсовой работы.
3. Краткая теория по теме курсовой работы.
4. Примеры числовых расчетов и графических решений.
5. Практическое использование полученных результатов.
6. Заключение. Выводы и рекомендации.
7. Список использованных источников.

Структура основной части курсовой работы обычно определяется содержанием задания на курсовое проектирование и последовательностью перечисленных в нем вопросов. Однако студент может отойти от этой последовательности и придерживаться собственной логики изложения материала, если считать её более целесообразной, но не в ущерб содержания сути изложения.

Основную часть необходимо разбить на отдельные разделы.

1. Во введении должны быть отражены задачи в области развития нефтяной и газовой промышленности, роль и значение законов подземной гидромеханики и гидродинамических расчетов для проектирования разработки и эксплуатации скважин на нефтяных и газовых месторождениях. Введение должно отражать суть задачи, стоящей перед автором. Объем введения - до 3 страниц.

2. Во втором разделе должны быть сформулированы цели и задачи курсовой работы. Необходимо объяснить, какой конечный результат хотел бы получить и видеть автор в результате решения поставленных задач курсовой работы - до 3 страниц.

3. Краткая теория по теме курсовой работы должна содержать анализ научно-технической литературы по сути рассматриваемых вопросов. При этом должны быть обязательно ссылки на используемую литературу. Объем - до 10 страниц.

4. В расчетной части приводятся гидродинамические расчеты по полученным формулам или расчетным схемам и алгоритмам. Расчеты рекомендуется выполнять в системе СИ с указанием размерностей физических величин с использованием ЭВМ (прилагается распечатка программы). Объем расчетной части - до 5 страниц.

5. Заключение и выводы делаются студентом по результатам выполненной работы в соответствии с ранее сформулированными целью и задачами. Объем - до 4 страниц.

6. Список использованной литературы приводится в конце работы в алфавитном порядке.

Общий объем курсовой работы - не более 25...30 страниц.

Выполнение курсовой работы состоит из следующих этапов:

- получение задания на курсовую работу;
- изучение настоящего учебно-методического пособия;
- составление плана работы и изучение литературы по теме;
- проведение необходимых расчетов и их анализ;
- оформление курсовой работы;
- защита курсовой работы.

### **3. Основные требования к выполнению и оформлению курсовой работы**

Курсовая работа оформляется в соответствии со стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), основные требования которой применительно к оформлению курсовых и дипломных проектов, отчетов по производственной практике студентов изложены в [1].

Текстовая часть курсовой работы выполняется на белой бумаге формата А4, допускается применять листы тетрадной бумаги (в клетку) стандартного формата. Текст курсовой работы выполняется рукописным шрифтом чернилами или пастой темного цвета (черного, синего или фиолетового). Высота букв должна быть не менее 2,5 мм, почерк должен быть четким, достаточно легко читаемым. Также допускается оформление машинописным способом с использованием компьютерной техники. Текст должен быть оформлен при помощи шрифта Times New Roman 14 размера через 1,5-2 интервала.

При выборе формулы из литературного источника должна быть дана ссылка на него (с указанием номера этого источника из списка использованной литературы, приводимого в конце курсовой работы).

Все расчетные формулы должны даваться с пояснениями всех входящих в формулу физических величин и указанием их размерностей в системе СИ в той последовательности, в какой написаны в формуле буквы, обозначающие эти величины,

Как правило, все расчеты, связанные с выполнением курсовой работы, должны выполняться на ЭВМ. В тексте программы необходимо размещать комментарии, поясняющие структуру алгоритма, порядок и последовательность проводимых операций.

Курсовая работа должна быть своевременно выполнена и в установленный срок в оформленном виде сдана руководителю (для студентов-заочников в деканат заочного факультета для ее регистрации с последующей передачей преподавателю-консультанту).

Защита курсовой работы является завершающим этапом её выполнения и представляет краткое изложение студентом сути работы перед руководителем курсовой работы



(преподавателем-консультантом). Изложение работы должно быть рассчитано студентом на время не более 3-5 минут. При защите курсовой работы студент должен кратко изложить цели и задачи работы, обосновать постановку задачи и теоретические методы решения ее, показать умение выполнять гидродинамические расчеты, делать анализ полученных результатов и выводы.

Дифференцированная оценка курсовой работы производится по результатам защиты и ответов на заданные в ходе защиты вопросы с учетом качества выполнения и оформления работы.

### Планируемые результаты обучения для формирования компетенции и критерии их оценивания

Дисциплина «Подземная гидромеханика нефтяного пласта».

Код, направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело

Направленность - Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти

Код компетенции	Код и наименование результата обучения по дисциплине	Критерии оценивания результатов обучения			
		1-2 (0-60)	3 (61-75)	4 (76-90)	5 (91-100)
ПКС-6.2 Анализирует правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Знать (З1): правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Не знает правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Частично знает правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Знает правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы	Знает и умеет применять на практике правила технической эксплуатации технологических объектов нефтегазового комплекса и методов управления режимами их работы
	Уметь (У1): верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования	Не умеет верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования	Слабо умеет верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования	Умеет верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования	Умеет быстро и в оптимальных объемах верно выбирать технологические режимы работы скважин и оборудования
	Владеть (В1): навыками работы со средствами обработки информации	Не владеет навыками работы со средствами обработки информации	Обладает слабыми навыками работы со средствами обработки информации	Владеет навыками работы со средствами обработки информации, но допускает незначительные ошибки	В совершенстве владеет навыками работы со средствами обработки информации

**КАРТА**

**обеспеченности дисциплины (модуля) учебной и учебно-методической литературой**  
 Дисциплина **Подземная гидромеханика нефтяного пласта**  
 Код, направление подготовки **21.03.01 Нефтегазовое дело**  
 Профиль **Эксплуатация и обслуживание объектов добычи нефти**

№ п/п	Название учебного, учебно-методического издания, автор, издательство, вид издания, год издания	Количество экземпляров в БИК	Контингент обучающихся, использующих указанную литературу	Обеспеченность обучающихся литературой, %	Наличие электронного варианта в ЭБС (+/-)
2	Квеско Б.Б., Карпова Е.Г. Подземная гидромеханика: учебное пособие – Томский политехнический университет, 2012. – 168 с.	Электр. ресурс	30	100	+

И.о. заведующего кафедрой \_\_\_\_\_ Р.Д. Татлыев

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Библиотекарь II категории \_\_\_\_\_ А.Д. Кодряк

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Дополнения и изменения  
к рабочей программе дисциплины (модуля)**

---

на 20\_\_ - 20\_\_ учебный год

В рабочую программу вносятся следующие дополнения (изменения):

---

---

---

---

---

Дополнения и изменения внес:

\_\_\_\_\_ (должность, ученое звание, степень) \_\_\_\_\_ (подпись) \_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

Дополнения (изменения) в рабочую программу рассмотрены и одобрены на заседании кафедры

\_\_\_\_\_  
(наименование кафедры)

Протокол от «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_\_.

И.О. Заведующего кафедрой \_\_\_\_\_ Р.Д. Татлыев

**СОГЛАСОВАНО:**

И.о. Заведующего выпускающей кафедрой/

Руководитель образовательной программы \_\_\_\_\_ Р.Д. Татлыев

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.